

Az Internet térbeli szerkezetének elemzése és a Hálózati Mérések Virtuális Obszervatóriuma

A doktori értekezés tézisei

MÁTRAY PÉTER

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Informatika Doktori Iskola
Információs Rendszerek Doktori Program

Iskolavezető: Dr. Benczúr András egyetemi tanár
Programvezető: Dr. Benczúr András egyetemi tanár
Témavezetők: Dr. Csabai István egyetemi tanár és
Dr. Vattay Gábor egyetemi tanár

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Informatikai Kar
Információs Rendszerek Tanszék



Budapest, 2013

Bevezetés

Az elmúlt bő egy évtized során az Internet alapvető eszközévé vált a világ magán-, üzleti és tudományos célú kommunikációjának. Ezen folyamattal párhuzamosan a hálózat működésének megismerése és megértése több tudományterületen is az érdeklődés előtérébe került. Az Internettel kapcsolatos kutatások egyik központi témája az Internet topológiájának feltérképezése és modellezése. E feladat jelentősége részben abból fakad, hogy a strukturális viszonyok alapvető hatással vannak a hálózat kulcsfontosságú stabilitási és dinamikai tulajdonságaira.

Az Internet topológiáját hagyományosan gráfokkal reprezentáljuk, ahol a gráf csúcsai az Internet különböző absztrakciós szintjeihez tartozó entitásokat (pl. hálózati eszközöket vagy autonóm rendszereket), az élek pedig ezen entitások közötti kapcsolatokat jelölnek (pl. az eszközök közötti fizikai kapcsolatot, vagy az autonóm rendszerek közötti üzleti kapcsolatot). Az így adódó gráfok elemzése több lényegi felfedezéshez vezetett az Internet stabilitásával és evolúciójával összefüggésben. Ugyanakkor tény, hogy az Internet a fizikai térben létezik, és így a viselkedését meghatározó alapvető motívumok között szerepet kell kapnia a metrikus viszonyoknak is. Így például az absztrakt topologikus megközelítéssel nem tudunk választ adni azokra a fontos kérdésekre, amelyek a hálózat térbeli struktúrájával állnak kapcsolatban. Ezek közé tartoznak például a hálózat földrajzi hibatűrésével, az útvonalválasztási módszerek hatékonyságával, vagy a térbeli információ-terjedéssel kapcsolatos egyes kutatási problémák.

Az említett kérdések vizsgálatához, illetve általánosságban, a hálózat szerkezetének és dinamikájának pontosabb megértéséhez és optimalizálásához elengedhetetlen a hálózat térbeli viszonyainak a felderítése. A disszertáció célja, hogy olyan újfajta módszereket, eszközöket és empirikus eredményeket mutasson be, amelyek együttesen elősegítik az Internet nagyskálás térszerkezetének feltárását, elemzését és megértését.

Alkalmazott módszerek

Az Internet térbeli vonatkozásainak vizsgálatához a dolgozatban négy részterületről mutattunk be eredményeket. Először a hálózati csomópontok valószínűségi alapon történő lokalizációjához adtunk elvi keretet, majd statisztikai módszerekkel elemeztük az Internet-csomagok utazási ideje és a csomagok által megtett távolság közötti kapcsolatot. Egy több száz, földrajzilag elosztott referencia-

állomás segítségével gyűjtött kalibrációs adathalmaz analízisével modelltadtunk az Interneten megfigyelhető idő-út eloszlásra. A módszerünk pontosságát és robusztusságát két nagyméretű referencia-adathalmazon ellenőriztük.

Kétféle módszertadtunk a nagyskálás geolokalizációs felmérések során adódó térbeli eloszlások aggregált megjelenítéséhez. Az első módszer egy gömbi hisztogramot, a második egy gömbi kockázatfüggvényt definiál a találatonkénti térbeli eloszlások alapján. A számítások gyakorlati kivitelezéséhez az eloszlásokat a Hierarchikus Háromszögháló (Hierarchical Triangular Mesh, HTM) gömbi indexelési eljárással diszkrétizáltuk.

Az Internet térbeli szerkezetének empirikus elemzéséhez 700 földrajzilag elszórt pontból végeztünk aktív topológia-méréseket, majd az így felfedezett Internet rész-gráf csúcsaihoz valószínűségi IP-geolokalizáció segítségével rendeltünk földrajzi koordinátákat. Megvizsgáltuk az így adódó, térbe ágyazott topológia térbeli tulajdonságait: jellemeztük a hálózati linkek hossz-eloszlását, valamint elemeztük a végpont-végpont útvonalakra megfigyelhető térbeli eltéréseket és aszimmetriákat.

A dolgozatban bemutatott módszerek, mérések és elemzések megvalósításához az általunk létrehozott Hálózati Mérések Virtuális Obszervatóriumát használtuk (Network Measurement Virtual Observatory, NMVO). Az NMVO egy olyan tudományos adattárház, amely nem csupán az aktív Internet-mérési adatok hatékony kezelését és elemzését teszi lehetővé, hanem támogatja a nyers és kiértékelt kísérleti adatok különböző interfészeken keresztül történő széles körű megosztását is.

Tézisek

1. Valószínűségi IP-geolokalizáció

Az internetes csomópontok térbeli helyzetének a meghatározása nehéz probléma, mivel a hálózati eszközök IP-címe és térbeli pozíciója között nincs direkt kapcsolat. A dolgozatban bemutattunk egy újfajta mérés-alapú IP-geolokalizációs módszert, amellyel becsülni tudjuk a hálózati állomások földrajzi helyzetét. Ehhez ismert pozíciójú referenciapontokat használunk, ahonnan jelterjedési időket mérünk a célponthoz, majd az adódó térbeli feltételrendszer alapján, ún. multi-laterációs technikával határozzuk meg a célpont koordinátáit.

A dolgozatban először megadtunk egy elvi keretet a mérések valószínűsége-

gi alapon történő kiértékeléséhez, majd felállítottuk azt a modellt, amellyel egy adott pontból mért késleltetések alapján a pontra centrált térbeli eloszlásokat tudunk származtatni. A módszerünkben a pozícióbecslés metainformációk (pl. hosztnevekben szereplő országkódok) helyett mért fizikai paraméterek alapján zajlik, direkt kapcsolatot teremtve a fizikai és becsült hely között. Ennek egyik fontos következménye, hogy a geolokalizáció hibája becsülhetővé válik, lehetővé téve az eredmények megbízhatóságának ellenőrzését.

A korábbi mérés-alapú eljárásokkal szemben a módszerünk nem merev földrajzi megszorításokkal, hanem gömbi valószínűségeloszlásokkal dolgozik. Így egy adott célállomásra nem csupán a becsült régiót és a koordinátákat adja vissza, hanem egy térbeli eloszlást is, amely megadja, hogy a Föld egyes részein milyen eséllyel található a célpont. Az eljárás másik fontos újítása, hogy míg az irodalomból ismert algoritmusok referenciapontonkénti kalibrációval építik fel a belső modelljüket, addig az általunk bemutatott módszer együttesen kezeli a kalibrációs adatpontokat, és egyetlen közös idő-út modellt állít fel az összes referenciapont számára. Ezen újítás egyik fontos következménye, hogy a módszerünk kevésbé érzékeny a kalibráció során fellépő mérési hibákra és túlillesztésekre.

A fejezethez tartozó eredmények

- Kidolgoztuk azt a valószínűségi idő-út modellt, amellyel az Internet-csomagok késleltetéseit távolság-eloszlásokká tudjuk transzformálni. Ehhez először megmutattuk, hogy a csomagok által megtett földrajzi távolságok standardizált eloszlása jó közelítéssel normálisnak tekinthető, majd Kolmogorov-Smirnov-próbák sorozatával ellenőrtük, hogy a normalitás az egyedi d körbefordulási idők esetén sem sérül. Ily módon beláttuk, hogy egy adott d késleltetéshez a megfigyelhető távolságok eloszlása jól leírható egy csonkított normális eloszlással, ahol az eloszlás várható értéke és szórása a d késleltetéstől függő paraméterek.
- Két különböző referencia-adathalmazon végezett validációs tesztel beláttuk, hogy a módszerünk robusztusabb és pontosabb lokalizációt tesz lehetővé, mint két fontos korábbi, nem valószínűségi alapú modell, a CBG és az Octant. A módszerünk a hálózat routereinek lokalizációja esetén 30 km-es medián hibát ér el.

A fejezet alapjául a [3] publikáció szolgál.

2. A geolokalizáció alkalmazása nagyskálás felmérésekben

A geolokalizációs módszerünk kialakításakor mindvégig szem előtt tartottuk, hogy a több tíz- vagy százezer elemű IP-listák pozíció-bebecslése is gyorsan végrehajtható legyen. Ily módon az egyedi IP-címek lokalizációja mellett lehetővé válik a tömegesen előforduló hálózati tartalmak és tematikus célpontlisták – így például az Internet-topológia – térbeli eloszlásának a vizsgálata.

A valószínűségi geolokalizáció minden célpontra egy gömbi eloszlást, valamint egy pontbecslést, a gömbi eloszlás várható értékét adja vissza. A nagyméretű találati listákra megjelenő térbeli mintázatok vizsgálatához szükség van a célpontonkénti eloszlások megfelelő aggregálására. A dolgozatban kétféle megközelítést adtunk az egyedi eloszlások aggregálásához, és egy esettanulmányon keresztül térkép-vizualizációkat mutattunk be mindkét módszerhez.

A fejezethez tartozó eredmények

- Módszert adtunk a valószínűségi geolokalizáció eredményeinek aggregálásához. A célpontlistára adódó együttes térbeli eloszlás közvetlen megjelenítéséhez bevezettük a hisztogram-térképet, ami a legsűrűbb találati régiókat emeli ki. A jól lokalizált, de potenciálisan kisebb összsúlyú tartományok kiemeléséhez bevezettünk egy olyan számítási módot, amely az egyedi eloszlások helyett azok transzformáltjait aggregálja. Beláttuk, hogy a gömbi eloszlásból képzett koszinuszos hibafüggvény jól aggregálható, mert egyrészt az egyedi találatokhoz tartozó pontbecsléseket emeli ki, másrészt a találatok aggregációban megjelenő súlyát a variabilitástól, vagyis a jól lokalizáltságtól teszi függővé. A hibafüggvényekből adódó együttes gömbi kockázatfüggvény vizualizációját likelihood-térképnek nevezzük.

A fejezet alapjául a [4] publikáció szolgál.

3. Az Internet-infrastruktúra térbeli szerekezetének empirikus vizsgálata

Az előző pontokban szereplő eredmények lehetővé teszik az Internet térbeli szerkezetének empirikus vizsgálatát. E célból több mint 700 PlanetLab mérőpont felhasználásával elvégeztünk egy globális topológia-felderítést, amelyből rekonstruáltunk egy 16 ezer csúcspontból és 44 ezer élből álló Internet részgráfot. A

topológia csomópontjaihoz valószínűségi IP-geolokalizációval földrajzi koordinátákat rendeltünk. Az így nyert adathalmaz lehetőséget ad a hálózati linkek és a végpont-végpont útvonalak térbeli jellegének vizsgálatára.

A fejezethez tartozó eredmények

- Megmutattuk, hogy a beágyazott Internet-gráf élhossz-eloszlása skálafüggetlen, és az eloszlás globális jellege jól leírható a $P(\varrho) \sim 1/\varrho$ sűrűségfüggvénnyel. Ugyanakkor az eloszlás farkában elkülöníthető, $P(\varrho) \sim \varrho^{-\alpha}$ alakú rezsimeket azonosítottunk, ahol a regionális, kontinentális és transzkontinentális távolság-tartományokhoz különböző α exponensek tartoznak.
- A végpont-végpont útvonalak térbeli pályáinak vizsgálatával megállapítottuk, hogy az interkontinentális utakra az ideális főköri ívtől való kisebb eltérések figyelhetők meg, mint a kontinentálisakra, ugyanakkor az Európa és Ázsia közötti utakra jellemzőek az extrém mértékű megnyúlások. A hop-szerinti és térbeli távolságok összevetésével kvantifikáltuk, hogy a csomagok átlagosan az út első és utolsó 30%-án valamely végpont közvetlen közelében vannak, miközben a hopok középső 20%-án a teljes földrajzi táv 80%-át ívelik át. A hálózati útvonalak aszimmetriájának vizsgálatával megmutattuk, hogy a kontinensek közötti utak földrajzi értelemben szimmetrikusnak tekinthetők, ugyanakkor rámutattunk néhány szokatlan, kiugró aszimmetriát okozó útválasztási gyakorlatra.

A fejezet alapjául az [1] és a [2] publikáció szolgál.

4. Hálózati Mérések Virtuális Obszervatóriuma

Az Internet különböző strukturális és dinamikus tulajdonságainak megértéséhez elengedhetetlen, hogy információt gyűjtsünk a rendszer állapotáról. Maguk a hálózati eszközök, illetve az őket üzemeltető szolgáltatók különböző üzleti, jogi, biztonsági és technikai okokból nagyon kevés információt nyújtanak, ezért a hálózati mérések központi szerepet játszanak az Internet-kutatásban. Noha az elmúlt évtizedben számos kísérleti infrastruktúra jött létre a kutatási célú adatgyűjtés elősegítésére, a nagyméretű – és gyakran összetett – mérési adathalmazok kezelése komoly kihívást jelent. E probléma megoldására létrehoztuk a Hálózati Mérések Virtuális Obszervatóriumát (Network Measurement Virtual

Observatory, röviden NMVO), ami egy tudományos adattárház és a köré épülő szolgáltatások együttese. Az NMVO a mérési adatok archiválása és megosztása mellett lehetővé teszi a nagyméretű adathalmazokon végzett számítások szerveroldali végrehajtását is, ezzel lényegesen felgyorsítva egyes kutatási kérdések megválaszolását. Az NMVO kezeli – más hálózati mérések adatai mellett – a valószínűségi IP-geolokalizációs kísérleteink minden nyers és kiértékelt adatát, és így módon alapvetően járult hozzá a dolgozatban ismertetett eredmények létrehozásához. Az NMVO-t több nemzetközi kutatási projekt is hasznosítja, valamint szerepet játszik az európai Internet-mérési adatok federálásában is.

A fejezethez tartozó eredmények

- Megvalósítottunk egy olyan eszközrendszert, amely lehetővé teszi különböző típusú aktív hálózatmérési adatok hatékony kezelését, elemzését és megosztását. Ehhez kidolgoztunk egy olyan relációs adatmodellt, amely a kísérleti információk széles skáláját képes reprezentálni (pl. csomópontok, linkek, idősorok, csomagmintázatok, geográfiai jellemzők). Az adatbázisban leírható a legtöbb egy-pont aktív (pl. ping, traceroute) és sok-pont aktív (pl. sáv szélesség, késleltetés-tomográfia) mérés, az ezekhez kapcsolódó nyers és meta-adatok, továbbá a kiértékelt eredmények is (skalár értékek, eloszlások és egyéb specializált eredmények, pl. geográfiai pozíciók, térbeli eloszlások). Ebben a struktúrában többféle mérési adatot összekapcsoló komplex lekérdezéseket is meg tudunk fogalmazni, valamint az adattisztítás, analitika és adminisztráció támogatására számos tárolt eljárást valósítottunk meg.

A fejezet alapjául az [5–8] publikációk szolgálnak.

A tézisek alapjául szolgáló publikációk

- [1] P. Mátray, P. Hága, S. Laki, G. Vattay, and I. Csabai. “On the Spatial Properties of Internet Routes”. *Elsevier Computer Networks*, **56**, pp. 2237–2248, 2012. DOI: 0.1016/j.comnet.2012.03.005. Impact Factor: 1.2.
- [2] P. Mátray, P. Hága, S. Laki, G. Vattay, and I. Csabai. “On the Network Geography of the Internet”. In: *Proc. of IEEE INFOCOM 2011*. Shanghai, China, 2011. DOI: 10.1109/INFCOM.2011.5934909. Acceptance rate: 23.4%.
- [3] S. Laki, P. Mátray, P. Hága, T. Sebők, I. Csabai, and G. Vattay. “Spotter: A Model Based Active Geolocation Service”. In: *Proc. of IEEE INFOCOM 2011*. Shanghai, China, 2011. DOI: 10.1109/INFCOM.2011.5935165. Acceptance rate: 15.9%.
- [4] Zs. Kallus, P. Hága, P. Mátray, G. Vattay, and S. Laki. “Complex Geography of the Internet Network”. *Acta Physica Polonica B*, **42**, pp. 1057–1069, 2011. DOI: 10.5506/APhysPolB.42.1057. Impact Factor: 0.9.
- [5] I. Csabai, A. Fekete, P. Hága, B. Hullár, G. Kurucz, S. Laki, P. Mátray, J. Stéger, G. Vattay, F. Espina, S.G. Jimenez, M. Izal, E. Magana, D. Morató, J. Aracil, F. Gómez, I. Gonzalez, S.L. Buedo, V. Moreno, and J. Ramos. “ETOMIC Advanced Network Monitoring System for Future Internet Experimentation”. In: *Proc. of IEEE TridentCom 2010 Conference*. Berlin, Germany, 2010. DOI: 10.1007/978-3-642-17851-1_20.
- [6] A. Ferreiro, T. Fichtel, J. López De Vergara, P. Mátray, F. Strohmeier, G. Tropea, and U. Weinsberg. “Semantic Unified Access to Traffic Measurement Systems for Internet Monitoring Service”. In: *Proc. of ICT-MobileSummit 2009*. Santander, Spain, 2009.
- [7] P. Mátray, I. Csabai, and P. Hága. “A Semantic Extension of the Network Measurement Virtual Observatory”. In: *Proc. of Advances in Databases and Information Systems (ADBIS)*. Riga, Latvia, 2009.
- [8] P. Mátray, I. Csabai, P. Hága, J. Stéger, L. Dobos, and G. Vattay. “Building a prototype for Network Measurement Virtual Observatory”. In: *Proc. of ACM SIGMETRICS 2007 MineNet Workshop*. San Diego, CA, USA, 2007. DOI: 10.1145/1269880.1269887.

További publikációk

- [9] D. Kondor, P. Mátray, I. Csabai, and G. Vattay. “Measuring the dimension of partially embedded networks”. *Accepted to Elsevier Physica A*, 2013. DOI: 10.1016/j.physa.2013.04.046. Impact Factor: 1.374.
- [10] J. Stéger, S. Laki, and P. Mátray. “A Monitoring Framework for Federated Virtualized Infrastructures”. In: *To appear in: Springer LNCS issue on Measurement-based experimental research: methodology, experiments and tools*. Ed. by L-Fabrega, P. Vila, D. Careglio, and D. Papadimitriou. Vol. 7586. 2012.
- [11] J. vd Ham, Ch. Papagianni, J. Stéger, P. Mátray, Y. Kryftis, P. Grosso, and L. Lymberopoulos. “Challenges of an Information Model for Federating Virtualized Infrastructures”. In: *Proc. of DMTF SVM Workshop*. Paris, France, 2011.
- [12] S. Laki, P. Mátray, P. Hágá, I. Csabai, and G. Vattay. “A Model Based Approach for Improving Router Geolocation”. *Elsevier Computer Networks*, **54**, pp. 1490–1501, 2010. DOI: 10.1016/j.comnet.2009.12.004. Impact Factor: 1.176.
- [13] I. Csabai, A. Fekete, P. Hágá, B. Hullár, G. Kurucz, S. Laki, P. Mátray, J. Stéger, and G. Vattay. “ETOMIC advanced network monitoring system for future Internet experimentation”. *Infocommunications Journal*, **LXV**, pp. 25–31, 2010. Invited Paper.
- [14] P. Hágá, P. Mátray, I. Csabai, and G. Vattay. “Modelling packet pair dispersion in multi hop network with correlated traffic”. In: *European Conference on Complex Systems, ECCS '09*. Warwick, UK, 2009.
- [15] S. Laki, P. Mátray, P. Hágá, I. Csabai, and G. Vattay. “A Detailed Path-latency Model for Router Geolocation”. In: *Proc. of IEEE TridentCom 2009 Conference*. Washington D.C., USA, 2009. DOI: 10.1109/TRIDENTCOM.2009.4976258.
- [16] I. Csabai, P. Hágá, P. Mátray, G. Simon, J. Stéger, and G. Vattay. “Results of Large-Scale Queueing Delay Tomography Performed in the ETOMIC Infrastructure”. In: *Proc. of IEEE INFOCOM 2006 Conference, Global Internet Symposium*. Barcelona, Spain, 2006. DOI: 10.1109/INFOCOM.2006.55.